



Principales algoritmos utilizados para resolver el Problema de Ruteo Vehicular y de Transporte Escolar

Main algorithms used to solve the Vehicle Routing Problem and the School Bus Routing Problem

Adrián Hernández Landa^{1*}, Omar Alba Hernández¹, Rodrigo Rodríguez Franco¹

¹ Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Sección 5a Reserva Territorial S/N, Col. Santa Bárbara, 91096

Xalapa-Enríquez, Ver.

*Autor de correspondencia: 237O02726@itsx.edu.mx

Recibido 15 de marzo 2024; recibido en forma revisada 20 de mayo 2024; aceptado 05 de noviembre 2024

RESUMEN

En el presente artículo se explican de manera breve los siete algoritmos más utilizados para resolver problemas de optimización de ruteo de vehículos y su similar de transporte escolar, encontrados en nuestra revisión sistemática de la literatura, así como una comparativa entre los mismos, a partir de los objetivos de optimización y la cantidad de trabajos que los utilizaron. En cuanto a los objetivos de optimización se encontraron catorce diferentes siendo los más recurridos la optimización de costos, seguidos por la optimización de la capacidad del vehículo y el tiempo total de recorrido, y finalmente la minimización de la distancia recorrida. Por su parte el país donde más trabajos se encontraron al respecto fue China, seguido de Turquía.

Palabras Clave: Algoritmo, VRP, SBRP, TSP, Métodos

ABSTRACT

The research was directed to determine the computer algorithms that have been most used to solve the vehicle routing problem, as well as the optimization objectives that each of their works followed. After find relevant works of the last years, we proceeded to filter them to work with those that answered our two questions clearly. In this article, the seven most used algorithms found in the systematic review are briefly explained, and it is presented a comparison between them, based on the optimization objectives and the number of works that used them. Regarding the optimization objectives, fourteen different ones were found, the most frequently used being cost optimization, followed by optimization of vehicle capacity and total travel time, and finally minimization of the distance traveled. On the other hand, the country where most works on this subject were found was China, followed by Turkey

Keywords: Algorithm, VRP, SBRP, TSP, Methods

INTRODUCCIÓN

El Vehicle Routing Problem (VRP) considerado del tipo NP-Hard y clasificado para identificar la ruta más corta entre dos o más nodos, está muy relacionado con el Traveling Salesman Problem (TSP). Existen muchas variantes de los VRP y dependerán en la forma en la que el vehículo será empleado para transportar, la calidad del servicio, sus características y la tecnología empleada.

El VRP, consiste en planear una ruta con la distancia más corta, desde su punto inicial hacia sus destinos, la trayectoria a realizar estará condicionada a no repetir domicilios durante el recorrido, y regresar al punto inicial del recorrido, aunado a que la capacidad del vehículo no puede ser excedida en ningún momento (Kumar y Panneerselvam, 2015).

La expresión matemática general para VRP fue desarrollada por Laporte en (1992) así: “ $LG = (V, A)$ como un grafo donde $V = \{0, ..., n\}$ es un conjunto de vértices que representan ciudades con un almacén ubicado en el vértice 0, y A es el conjunto de arcos” (Yigit, Unsal y Deperlioglu, 2018).

El TSP, tiene el objetivo de definir una ruta donde

cada punto del viaje tiene que ser visitado solo una vez en el recorrido y el punto final tiene que ser el mismo que el inicial (Osaba, Yang y Del Ser, 2020), el TSP es popularmente estudiado, para resolver problemas de optimización y también puede ser usado como base para intentar encontrar una solución de aproximación de un SBRP.

El School Bus Routing Problem (SBRP) es una variante del VRP, fue propuesta desde 1969 por Newton and Thomas y busca planificar rutas para transportar a los estudiantes desde las diferentes paradas de autobús hasta sus escuelas. Se deben considerar algunas restricciones en la planificación de la red como: número de plazas, cantidad de paradas de autobús y su ubicación, el horario de entrada escolar y la planificación horaria respectiva (Arias-Rojas, Jiménez y Montoya-Torres, 2012).

Para resolver un SBRP es importante considerar dividir el problema en subproblemas como: preparar los datos, identificar las paradas de autobús, desarrollar las rutas, programar y asignar los autobuses (Yigit, et al, 2018), (Orejuela y Hernández, 2019), (Hashi, Hasan y Zaman, 2016).

Además, aunque no es obligatorio, es una buena idea implementar un algoritmo heurístico o metaheurístico que pueda optimizar la ruta escolar, minimizando la distancia de ruta entre nodos o el tiempo de permanencia en el mismo trayecto, tratando de transportar un mayor número de estudiantes en el menor tiempo posible.

Definición General de Algoritmo

Se trata de una serie de pasos para crear una salida a partir de las entradas proporcionadas. Hablando de números, un algoritmo de optimización crea una nueva solución. x^{t+1} a un problema planteado a partir de una solución conocida x^t en una iteración o tiempo t . representada por,

Fórmula 1: Optimización de un Algoritmo

$$x^{t+1} = A(x^t, P(t))$$

“A” es un mapeo no lineal desde la solución proporcionada, o un vector d-dimensional, x^t para una nueva solución x^{t+1} . “A” tiene k parámetros $P(t) = (p_1, p_2, \dots, p_k)$, que puede tener dependencia de tiempo y que igualmente podría incrementarse si es necesario (Yang y He, 2013).

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta revisión sistemática de la literatura se utilizó la propuesta por Kitchenham (2004) que define cinco pasos que se deben implementar: primero se definieron las preguntas de investigación consistentes en: ¿Cuáles son los algoritmos más utilizados para VRP y SBPR? y ¿Bajo qué objetivos de optimización se desarrollaron los trabajos? Posteriormente, se realizó una búsqueda literaria en las siguientes bases de datos digitales: ACM, IEEE Xplore, Research Gate y Science Direct de las que se obtuvieron 71 documentos. A continuación, se eliminaron los artículos que no fueron relevantes en nuestra investigación, pues no se identificaban definiciones claras sobre algoritmos, métodos o como se resolvió un VRP por medio de un algoritmo, para quedarnos con 33. Como resultado del paso anterior se realizó una matriz de extracción que se muestra en la Tabla 3 (Anexo 2). Finalmente, se realizó la concentración de la información obtenida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los algoritmos de optimización de rutas más usados para resolver VRP y SBRP en los últimos años, definiendo los tipos de métodos comunes y comparándolos para determinar su principal uso.

Métodos

Métodos Exactos

Utilizados para validar los algoritmos que identificarán una solución óptima, también prueban los resultados para todas las instancias del problema combinatorial, ejecutado en un tiempo finito o demuestran que no existe una solución viable. Estos para la programación entera tienen como ventajas: encontrar soluciones óptimas si el algoritmo sigue su ejecución; lograr obtener información importante sobre los límites superior e inferior de la solución óptima aun cuando el mismo se detenga antes de que finalice; y permiten probar en partes específicas del área de búsqueda en las que no se pueden encontrar soluciones óptimas (Tahami y Fakhravar, 2022)

Métodos Heurísticos

Empleados en situaciones del mundo real, para

construir un modelo matemático como algo simple, es decir, encontrar una solución óptima, pero no imposible. Sus razones de uso son: fáciles de implementar, muestran mejoras sobre los métodos tradicionales, lograr resultados rápidos, adaptables a variaciones, sencillo de encontrar buenos resultados en un modelo iterativo. Los 7 métodos básicos son (Silver, 2004): soluciones generadas aleatoriamente; descomposición / partición de problemas; métodos inductivos; métodos que reducen el espacio de soluciones; métodos de aproximación; métodos constructivos y mejora local.

La elección de qué enfoque heurístico (o metaheurístico) utilizar dependerá de (Silver, 2004): identificar si la decisión será estratégica, táctica u operacional; cuántas veces se seleccionará una decisión; tiempo para desarrollar una solución óptima; experiencia de las personas que toman las decisiones; el tamaño del problema según el número de variables y presencia de elementos estocásticos.

Métodos Metaheurísticos

Usados en los últimos años para resolver problemas NP-Hard en un tiempo aceptable. Se

pueden definir como un proceso que combina algunos conceptos heurísticos para encontrar una solución, también es un método iterativo que puede modificar y clasificar soluciones heurísticas para crear una solución superior. Para encontrar una solución óptima comienzan con respuestas aleatorias y avanzan tomando los operadores y actualizando las soluciones anteriores. En general, los algoritmos que implementan este tipo de métodos, siguen el mismo mecanismo para encontrar la solución óptima, es decir, en la mayoría de los casos la búsqueda comienza encontrando una o más soluciones aleatorias en un rango aceptable de variables (Rajabi, Toloie y Motadel, 2021).

Algoritmos

Randomized Rounding

Es una técnica utilizada en los algoritmos de optimización y aproximación combinatoria, la idea es convertir soluciones fraccionarias de programas lineales (LPs), en soluciones enteras. Usado en donde la optimización exacta no es computacionalmente viable (Raghavan y Thompson, 1987). Son del tipo NP-Hard y muchos de ellos

pueden representarse como problemas lineales enteros 0-1, donde las variables toman valores en $\{0,1\}$, que se conocen como relajaciones fraccionarias y se pueden resolver en un tiempo polinomial (Raghavan y Thompson, 1987).

Ant Colony Optimization (ACO)

Del tipo metaheurístico para resolver problemas de optimización combinatoria, fue desarrollado emulando un entorno real de colonia de hormigas, su principio es que las hormigas depositan feromonas en el suelo, desde el nido hasta la comida, como marca de camino para las demás hormigas, mientras más material exista en un camino, podría indicar que la distancia es más corta hacia la comida. El modelo se utilizó inicialmente para TSP y el objetivo era encontrar la ruta más corta (Duan, 2011).

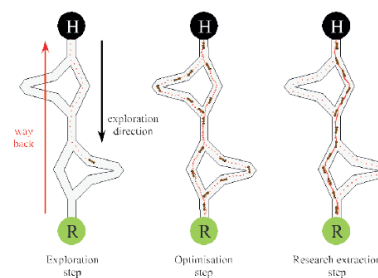


Figura 1 Optimización por Colonia de Hormigas (Katona, Lénár y, Juhász, 2019)

Genetic Algorithm (GA)

Inspirado en el proceso de la evolución biológica, es similar a la teoría de Darwin's, en el que sobreviven los más aptos, fue propuesto por J.H. Holland en 1992. La selección de la representación cromosómica, la mutación cruzada y el cálculo de la función de aptitud son los elementos clave del GA. Su procedimiento básico consiste en que, a partir de una iniciación aleatoria de cromosomas, se calculan sus aptitudes para seleccionar un par y producir descendencia a mutar para ser integrada en una nueva población de selección, cruce y mutación.

Las operaciones se repetirán sobre la población actual hasta completar la nueva población, la expresión matemática se representa de la siguiente manera (Katoch, Chauhan y Kumar, 2021):

Fórmula 2: Selección y Reproducción en los GA

$$R = (G + 2\sqrt{g}) / 3G$$

Donde: g = Número de generaciones, G = Total de generaciones evolutivas establecidas por población

R = Cambios dinámicos e incrementos con el aumento del número de generaciones evolutivas.

Clarke & Wright's Savings Algorithm (CW)

Propuesto en 1964 y se le conoce como el algoritmo de ahorro. Comienza con una ruta por cliente y sobre la marcha va combinando rutas constantemente para reducir costes siempre que la combinación permita minimizar los gastos. Es fácil de implementar y demostrar una eficiencia en el VRP, usado como base para el desarrollo de muchos algoritmos relacionados con la VRP (Cao, 2012).

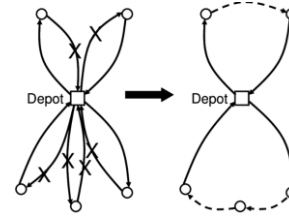


Figura 2 Ruta optimizada al combinar varias de ellas (Nowak, 2005)

Matching Algorithm

En general, cuando dos objetos se emparejan adecuadamente y tienen la misma apariencia, se conoce como Matching. Siguiendo esta definición, Gale y Shapley propusieron la teoría del emparejamiento en 1962, es un modelo matemático bajo una teoría de juegos, se aplica al mercado matrimonial y admisión universitaria, busca emparejar objetos similares como, por ejemplo: hombres y mujeres, escuela y estudiantes, compradores y vendedores, en la tabla 1 se muestra

su clasificación (Ren, et al, 2021).

Column Generation Algorithm

Resultan útiles para resolver problemas matemáticos de muchas variables mediante un método iterativo añadiendo las variables del modelo, normalmente solo es necesaria una pequeña parte de las variables, para demostrar que se realiza una optimización. (Lübbecke, 2010).

Tabla 1
Clasificación de los emparejamientos

Clasificaciones	Coincidencia explícita	Coincidencia implícita
Inclusiones	Uno a uno Muchos a uno Muchos a muchos	Coincidencias encontradas
		Coincidencias de artículo a usuario
		Coincidencias de entidad relación
		Coincidencias de imagen
Casos típicos	Coincidencias matrimoniales	Pregunta -respuesta
	Admisiones universitarias	Artículo -Revisor
	Relación cognitiva	Música - Usuario

Skyline Algorithm

Los beneficios se aplican a un problema de optimización y es uno de los operadores más valiosos

en la toma de decisiones multicriterio. Empleado para encontrar las mejores filas en una base de datos multidimensional, también puede identificar los valores que no están dominados por otros, en la misma colección de datos. Dado un conjunto de tuplas de dimensión d, la tupla p1 domina p2, si p1 no es peor que p2 en cualquier otra dimensión y p1 es mejor que p2 en al menos una dimensión. notación: $p1 < p2$ (Bouderar, Alaoui y Hadi, 2019).

Search Algorithm

Utilizado para obtener la información almacenada en una estructura de datos o calculada en un espacio de búsqueda, para una predicción de pasos de retro síntesis, logrando una ruta más simple. Se clasifica en búsquedas no informadas e informadas, el primero no explota ninguna información sobre el coste de las transiciones de estado, como búsquedas en profundidad y en amplitud, el segundo tiene una función heurística para determinar la distancia entre el estado actual y el final, con la intención de guiar la evolución de la búsqueda. El resultado es una correcta búsqueda en un buen tiempo de respuesta, mientras no sea la

solución óptima. Las búsquedas del primero mejor, son una búsqueda heurística típica con el concepto de una prioridad de cola (Yinjie, et al, 2022).

Bat Algorithm (BA)

Se basa en la ecolocalización, emulando la mayoría del comportamiento de los murciélagos, para detectar presas, evitar obstáculos y localizar sus grietas de descanso. Es eficiente cuando se necesita inicialmente una solución veloz, al cambiar de exploración a manipulación, como muchos algoritmos metaheurísticos, es simple, flexible y fácil de implementar. Aplicable a la optimización, clasificación, procesamiento de imágenes, selección de características, programación, minería de datos y otras, también se ha demostrado que BA puede implementarse con problemas no lineales eficientemente (Yang y He, 2013).

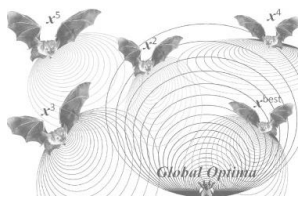


Figura 3.- Técnica de ecolocalización (Al-Betar y Awadallah, 2018)

Comparación de Algoritmos

En la Tabla 2 (Anexo 1) se puede observar la clasificación resultado de la RSL, que permite

identificar los diferentes algoritmos utilizados y los aspectos de optimización que se buscó alcanzar en cada uno de los trabajos estudiados. Siendo los principales la minimización de costos, tiempo y distancia, así como considerar la capacidad del vehículo. En la misma tabla se puede apreciar que los algoritmos más frecuentemente utilizados son los Algoritmos Genéticos y la optimización de Colonia de Hormigas. A continuación, se explican los resultados de los algoritmos tratados.

Randomized Rounding Algorithm: es rápido y adecuado donde el tiempo de transición entre rutas es constante (Zeng, Chopra y Smilowitz, 2022). Ant Colony Optimization Algorithm: puede reducir los costes de operación al compartir un autobús escolar mejorando las distancias recorridas (Han y Zhang, 2019); se puede implementar para reducir solo el tiempo y la distancia en una ruta (Yigit *et al*, 2018), y mediante un modelo híbrido resultante de los modos tradicional y colaborativo puede dar buenos resultados (Xue, 2023). New Heuristic Algorithm: Mediante un proceso de optimización de rutas y vehículos puede reducir la ruta de viaje y el número

de vehículos necesarios (Dragan, Keshavarzsaleh, Popović, Jereb y Intihar, 2022). Genetic Algorithm: podría utilizarse para reducir el consumo de combustible, evitar pérdidas de tiempo, reducir la contaminación y los costos de mantenimiento del vehículo (Yigit *et al*, 2018); es útil para reducir los costos globales y puede reducir el número de autobuses usados (Ümit y Kılıç, 2019); produce resultados aceptables cuando se cuenta con más de un autobús para servicios escolares (Ozmen y Sahin, 2021); ofrece un buen rendimiento en comparación con otros algoritmos (Ruiz, Soto-Mendoza y Barbosa, 2019); Se presenta como el mejor algoritmo para resolver problemas de rutas de vehículos con múltiples restricciones (Fan, 2020). Clarke & Wright's, es el método que proporciona mejores resultados para minimizar el número de vehículos y el costo de transporte en comparación con el sistema existente (Hashi *et al*, 2016). Column Generation Algorithm and Matching Algorithm: se lograron tasas de asistencia media del 70,8% y la tasa de servicio de los pasajeros ha alcanzado el 88,5% (Shen, Sun, Bai y Cui, 2021). Skyline

Algorithm: permite generar un gran conjunto de datos que contenga todas las posibilidades de combinación podría resolver el problema (Bouderar *et al*, 2019). Search Algorithm: mejora la precisión promedio en un 2,30 % y reduce significativamente el tiempo promedio de solución (Zhang y Yang, 2021). Bat Algorithm: es capaz de reducir la longitud máxima de ruta de una muestra en comparación con otros algoritmos (Kussman, Godat, Hanne y Dornberger, 2020).

CONCLUSIONES

El problema de rutas tratado en este artículo podría resolverse implementando un algoritmo de optimización, actualmente existen muchos de ellos para un propósito específico, en nuestra investigación podemos identificar que los aspectos comunes para resolver VRPs son: minimizar costos (Dragan *et al*, 2022), minimizar tiempo (Zeng *et al*, 2022), optimizar la capacidad del vehículo (Zeng *et al*, 2022) y minimizar distancia (Raghavan y Thompson, 1987), pero la elección depende del problema a resolver y el método de acuerdo a la complejidad del mismo. Adicional, podemos

determinar que los algoritmos más utilizados para una posible solución de VRPs son: los Algoritmos Genéticos, Optimización por Colonia de Hormigas y en muchos de los casos el de Clark y Wright's. La literatura sugiere que es mejor encontrar una solución óptima con una buena respuesta de tiempo, en lugar de una solución exacta, porque es probable que no lleguemos a obtener la solución esperada con los recursos computacionales dispuestos, lo que significa que el tiempo podría expirar antes de que la computadora proporcione o no una solución.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Betar, M. A., y Awadallah, M. A. (2018). Island bat algorithm for optimization. *Expert Systems with Applications*, 107, 126-145.
- Arias-Rojas, J. S., Jiménez, J. F., y Montoya-Torres, J. R. (2012). Solving of school bus routing problem by ant colony optimization. *Revista EIA*, (17), 193-208.
- Bouderar, B., Alaoui, L., y Hadi, M. Y. (2019, October). A skyline algorithm for solving the vehicle routing problem. In *Proceedings of the 4th International Conference on Big Data and Internet of Things* (pp. 1-7).
- Cao, B. (2012). Solving vehicle routing problems using an enhanced clarke-wright algorithm: A case study. In *Computational Logistics: Third International Conference, ICCL 2012, Shanghai, China, September 24-26, 2012. Proceedings 3* (pp. 190-205). Springer Berlin Heidelberg.
- Dragan, D., Keshavarzsaleh, A., Popović, V., Jereb, B., y Intihar, M. (2022, July). Heuristic-based optimisation approach: cost-effective school transportation. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 175, No. 4, pp. 220-237). Thomas Telford Ltd.
- Duan, H. (2011). Ant colony optimization: Principle, convergence and application. In *Handbook of Swarm Intelligence: Concepts, Principles and Applications* (pp. 373-388). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fan, W. (2020, December). Multi-constrained Vehicle Routing Problem Solution based on Adaptive Genetic Algorithm. In *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on*

- Algorithms, Computing and Artificial Intelligence (pp. 1-5).
- Han, X., y Zhang, X. (2019, April). School Bus Route Optimization Based on Improved Ant Colony Algorithm. In 2019 4th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT) (pp. 312-316). IEEE.
- Hashi, E. K., Hasan, M. R., y Zaman, M. S. U. (2016, December). GIS based heuristic solution of the vehicle routing problem to optimize the school bus routing and scheduling. In 2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) (pp. 56-60). IEEE.
- Katoch, S., Chauhan, S. S., y Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia tools and applications*, 80, 8091-8126.
- Katona, G., Lénárt, B., y Juhász, J. (2019). Parallel ant colony algorithm for shortest path problem. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1), 243-254.
- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews*. Keele: Keele University Technical Report TR/SE-0401.
- Kumar, S. N., y Panneerselvam, R. (2015). A time-dependent vehicle routing problem with time windows for e-commerce supplier site pickups using genetic algorithm. *India. Scientific Research Publishing*, 7(4), 181-194.
- Kussman, S., Godat, Y., Hanne, T., y Dornberger, R. (2020, January). A new hybrid bat algorithm optimizing the capacitated vehicle routing problem. In *Proceedings of the 2020 the 3rd International Conference on Computers in Management and Business* (pp. 107-111).
- Lübbecke, M. E. (2010). Column generation. *Wiley encyclopedia of operations research and management science*, 17, 18-19.
- Nowak, M. A. (2005). *The pickup and delivery problem with split loads*. Georgia Institute of Technology.
- Orejuela, J. P., y Hernández, G. J. (2019). Time Dependent School Bus Routing. *Revista Espacios*, 40(15).

- Osaba, E., Yang, X. S., y Del Ser, J. (2020). Traveling salesman problem: a perspective review of recent research and new results with bio-inspired metaheuristics. *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence*, 135-164.
- Ozmen, M., y Sahin, H. (2021, January). Real-time optimization of school bus routing problem in smart cities using genetic algorithm. In *2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 1152-1158). IEEE.
- Raghavan, P., y Thompson, C. D. (1987). Randomized rounding: a technique for provably good algorithms and algorithmic proofs. *Combinatorica*, 7(4), 365-374.
- Rajabi Moshtaghi, H., Toloie Eshlaghy, A., & Motadel, M. R. (2021). A comprehensive review on meta-heuristic algorithms and their classification with novel approach. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 8(1), 63-89.
- Ren, J., Xia, F., Chen, X., Liu, J., Hou, M., Shehzad, A., ... y Kong, X. (2021). Matching algorithms: Fundamentals, applications and challenges. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 5(3), 332-350.
- Ruiz, E., Soto-Mendoza, V., Barbosa, A. E. R., y Reyes, R. (2019). Solving the open vehicle routing problem with capacity and distance constraints with a biased random key genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 133, 207-219.
- Shen, C., Sun, Y., Bai, Z., y Cui, H. (2021). Real-time customized bus routes design with optimal passenger and vehicle matching based on column generation algorithm. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 571, 125836.
- Silver, E. A. (2004). An overview of heuristic solution methods. *Journal of the operational research society*, 55(9), 936-956.
- Tahami, H., y Fakhravar, H. (2022). A literature review on combining heuristics and exact algorithms in combinatorial optimization.

- European Journal of Information Technologies and Computer Science, 2(2), 6-12.
- Ümit, Ü. G., y Kılıç, F. (2019, October). A school bus routing problem using genetic algorithm by reducing the number of buses. In 2019 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU) (pp. 1-6). IEEE.
- Xue, S. (2023). An adaptive ant colony algorithm for crowdsourcing multi-depot vehicle routing problem with time windows. *Sustainable Operations and Computers*, 4, 62-75.
- Yang, X. S., y He, X. (2013). Bat algorithm: literature review and applications. *International Journal of Bio-inspired computation*, 5(3), 141-149.
- Yigit, T., Unsal, O., y Deperlioglu, O. (2018). Using the metaheuristic methods for real-time optimisation of dynamic school bus routing problem and an application. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 11(2), 123-133.
- Yinjie Jiang, Yemin Yu, Ming Kong, Yu Mei, Luotian Yuan, Zhengxing Huang, Kun Kuang, Zhihua Wang, Huaxiu Yao, James Zou, Connor W. Coley y Ying Wei. (2022), *Artificial Intelligence for Retrosynthesis Prediction*, Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company.
- Zeng, L., Chopra, S., y Smilowitz, K. (2022). A bounded formulation for the school bus scheduling problem. *Transportation science*, 56(5), 1148-1164.
- Zhang, H., y Yang, W. (2021, February). An Enhanced Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem. In *Proceedings of the 2021 13th International Conference on machine Learning and Computing* (pp. 79-85).

Anexo 1

Tabla 2

Uso de algoritmos

Algorithm	Min. Unid ades	Min. Dist anci a	M i n . T i e m p o	L i n e a r a t i v o	M i n . C o s t o s	Cons ider ar tráfi co	Ma x. Cal ida d	M in. Tr afi co	Min. Cont amin ación	M ax . Be ne fic ios	Capa cida d	Max. Dist anci a	Vent anas de tiem po	T i e m p o r e a l	País
Randomized Rounding	1			1											Estados Unidos de América
Ant Colony		1	3		2	1	1	1	1				1		China (2), Turquía
New Heuristic Algorithm			1		1										Eslovenia
Genetic Algorithm	2	3	2		2			1	1	1	3	1	1	1	Turquía (3), México, Estados Unidos de América
Clarke & Wright's			1		1										Bangladesh
Column Generation Algorithm					1		1						1	1	China
Matching Algorithm					1		1				1			1	China
Skyline		1									1				Marruecos
Search Algorithm											1				China
Bat Algorithm		1			1						1				Suiza
Total	3	6	7	1	9	1	3	2	2	1	7	1	3	3	

Anexo 2

Tabla 3

Matriz de extracción

Titulo	Base de Datos
A Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows for E-Commerce Supplier Site Pickups Using Genetic Algorithm	Research Gate
A Bounded Formulation for The School Bus Scheduling Problem	Research Gate
A comprehensive review on meta-heuristic algorithms and their classification with novel approach	Journal-Apire
A literature review on combining heuristics and exact algorithms in combinatorial optimization	Research Gate
A New Hybrid Bat Algorithm Optimizing the Capacitated Vehicle Routing Problem	ACM
A review on genetic algorithm: past, present, and future	Springer Link
A School Bus Routing Problem Using Genetic Algorithm by Reducing the Number of Buses	IEEE Xplore
A Skyline Algorithm for Solving the Vehicle Routing Problem	ACM
An adaptive ant colony algorithm for crowdsourcing multi-depot vehicle routing problem with time windows	ScienceDirect
An Enhanced Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem	ACM
An overview of heuristic solution methods	Research Gate
Ant colony optimization: Principle, convergence and application	Springer Link
Artificial Intelligence for Retrosynthesis Prediction	ScienceDirect
Bat algorithm: literature review and applications	Research Gate
Column generation	Research Gate
GIS based Heuristic Solution of the Vehicle Routing Problem to Optimize the School Bus Routing and Scheduling	IEEE Xplore
Heuristic-based optimisation approach: cost-effective school transportation	Research Gate
Island bat algorithm for optimization	ScienceDirect
Matching algorithms: Fundamentals, applications and challenges	IEEE Xplore
Multi-constrained Vehicle Routing Problem Solution based on Adaptive Genetic Algorithm	ACM
Parallel ant colony algorithm for shortest path problem	Research Gate
Procedures for Performing Systematic Reviews	Research Gate
Randomized rounding: a technique for provably good algorithms and algorithmic proofs	Springer Link
Real-time customized bus routes design with optimal passenger and vehicle matching based on column generation algorithm	ScienceDirect
Real-Time Optimization of School Bus Routing Problem in Smart Cities Using Genetic Algorithm	IEEE Xplore
School Bus Route Optimization Based on Improved Ant Colony Algorithm	IEEE Xplore
SOLVING OF SCHOOL BUS ROUTING PROBLEM BY ANT COLONY OPTIMIZATION	Research Gate
Solving the open vehicle routing problem with capacity and distance constraints with a biased random key genetic algorithm	ScienceDirect
Solving vehicle routing problems using an enhanced clarke-wright algorithm	Springer Link
The pickup and delivery problem with split loads	Research Gate
Time Dependent School Bus Routing	Revista
Traveling salesman problem a perspective review of recent research and new results with bio-inspired metaheuristics	Espacios
Using the metaheuristic methods for real-time optimisation of dynamic school bus routing problem and an application	ScienceDirect
	ACM